

KARELIA-AMMATTIKORKEAKOULU
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma

Jussi Nyyssönen

Optisen pinnanlaadun sorvaus

Opinnäytetyö
Maaliskuu 2014



OPINNÄYTETYÖ
Maaliskuu 2014
Kone- ja tuotantotekniikan
koulutusohjelma

Karjalankatu 3
80200 JOENSUU
p.+358 50 260 6800

Tekijä

Jussi Nyyssönen

Nimeke

Optisen pinnanlaadun sorvaus

Tiivistelmä

Työssä tutkittiin timanttityöstetyn, optisesti toiminnallisen pinnan laatua. Tarkoituksena oli tutkia millaisia, pinnanlaatuun vaikuttavia mikrorakenteita pintaan muodostuu. Tavoitteena oli myös selvittää laskennallisen ja toteutuneen pinnankarheuden suhdetta, sekä jos mahdollista, löytää ohjeelliset työstöarvot peilipintojen sorvaukseen.

Tutkimusta varten sorvattiin nanotyöstökoneella pinnankarheudeltaan laskennallisesti määriteltäviä testipintoja. Pintojen todellinen pinnankarheus mitattiin ja tuloksia verrattiin laskennallisiin karheuksiin. Mittauksen yhteydessä muodostetuista topografisista kuvioista tutkittiin pinnan mikrorakenteita sekä syitä niiden muodostumiseen. Testeissä verrattiin myös valon diffraktion määrää testipinnoilla.

Tulosten perusteella timanttityöstetty optinen pinta on aina ominaisuuksiensa suhteen kompromissi. Tutkimuksen mukaan sorvauksessa käytettävän nirkonsäteen pienennys edesauttaa hyvän pinnankarheuden saavuttamista. Tällöin kuitenkin joudutaan syöttönopeutta pienentämään, mikä puolestaan kasvattaa valon diffraktion määrää pinnassa. Tuloksista selviää myös, ettei laskennallinen pinnankarheus vastaa todellisuutta. Vaikka erot mitattujen ja laskennallisten pinnankarheuksien välillä ovat vain muutamia nanometrejä, ovat ne kuitenkin moninkertaisia teoreettiseen pinnankarheuteen verrattuna.

Tutkimus antoi hyödyllistä tietoa pinnankarheuden muodostumisesta ja sen laskentaan liittyvistä epävarmuuksista. Tulokset ovat kuitenkin vasta suuntaa antavia ja kattavan työstötapahtuman suunnitteluohjeistuksen luomiseksi olisi suoritettava jatko-testejä. Näillä testeillä tutkittaisiin työstettävän materiaalin vaikutusta lopputulokseen, sekä sitä, muuttuuko laskennallisen ja toteutuneen pinnankarheuden ero suoraan verrannollisesti suhteessa nirkonsäteeseen.


Kieli

suomi

Sivuja 27

Asiasanat

nanotekniikka, tarkkuus, sorvaus, optiset laitteet, valo

 Karelia UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES	THESIS March 2014 Degree programme in mechanical and production engineering Karjalankatu 3 FI 80200 JOENSUU FINLAND p.+358 50 260 6800
Author Jussi Nyyssönen	
Title Turning of Optically Functional Surfaces	
Abstract <p>This thesis was a research about quality of diamond turned optically functional surfaces. The aim was to study what kind of micro structures affecting the quality of the surface, were formed during the diamond turning process. In addition, the relationship between the calculated and the measured surface roughness was studied. Finally, the suitable machining parameters for turning mirror surfaces were assessed.</p> <p>For this research several test surfaces which were specified by their theoretical surface roughness were made with the ultra-precision machine. The actual surface roughness of test surfaces was measured and compared with the calculation results. The topographical microstructure of the test surfaces was examined to determine the causes of microstructure formation. Moreover, the amount of diffraction on the test surfaces was estimated.</p> <p>Based on the results, the diamond turned optical surface is always a compromise between the different surface properties. When the tool nose radius was reduced, it resulted a positive effect on the surface roughness. However, in this case it would be necessary to decrease the feed rate, which in turn results increased diffraction of light. The results also show that the calculated surface roughness does not correspond to reality. While the differences between the measured and the calculated roughness are only a few nanometers, in fact, the measured values are multiple times higher compared to the theoretical values.</p> <p>In conclusion, this study provided useful information about the formation of surface roughness and the uncertainties related to the calculation. The results are only indicative and, thus, for the creation of comprehensive guidelines for the machining, further tests should be executed.</p>	
Language Finnish	Pages 27
Keywords nanotechnology, precision, turning, optical devices, light	

Sisältö

Tiivistelmä

Abstract

1	Johdanto	5
2	Nanotyöstö	6
3	Pinnanlaadun suureet	7
4	Optinen pinnanlaatu	9
5	Sorvatun optisen pinnan ongelmat	10
6	Testikokoonpano	11
6.1	Nanotyöstökone	11
6.2	Terät.....	12
6.3	Materiaali.....	12
7	Testiajot.....	13
7.1	Laskennallinen pinnankarheus.....	14
7.2	Leikkuunopeus	15
7.3	Lastun paksuus	15
8	Testipintojen analyysit	16
8.1	Silmämääräinen tarkastelu.....	16
8.2	Valon projisointi.....	17
8.3	Pinnankarheuden mittaukset.....	18
8.4	Yhteenveto	23
9	Pohdinta	24
	Lähteet	26

1 Johdanto

Lopputuotteissa käytettävien komponenttien laatuvaatimuksien jatkuvasti kiristytessä joudutaan myös valmistusteknologiaa kehittämään eteenpäin. Nykyään pystytään jo luotettavasti valmistamaan rakenteita, joiden koko ja/tai muototarkkuus on nanometrien¹ luokkaa. Tällaisten tuotteiden valmistusta nimitetään nanoteknologiaksi. Käsite on varsin laaja, pitäen sisällään suuren määrän erilaisia valmistustekniikoita. (Venkatesh & Izman 2007, 1–2.)

Nanoteknologiaa hyödynnetään useilla eri aloilla. Tuotteet voivat olla esim. pieniä ja energiatehokkaampia komponentteja, täsmäläkkeitä, uusia materiaaleja tai funktionaalisia pinnoitteita. (Tekes 2010.)

Tuotettavat kappaleet itsessään eivät aina ole pieniä, vaan ne voivat olla isomman kappaleen pintaan kasvatettuja tai työstettyjä yksityiskohtia. Tällaisia nanotarkkuudella työstettyjä rakenteita hyödynnetään esimerkiksi puolijohteissa, näyttöpaneeleissa, LED-valoissa ja aurinkopaneeleissa. Nanotyöstetyt kappaleet voivat olla myös huomattavan suuria, kuten Hubble-avaruusteleskoopin peilit, joista suuremman halkaisija on 2,4 metriä. Pinnanlaadulliset ja geometriset vaatimukset niiden valmistuksessa olivat silloin, 80-luvun vaihteessa, ennennäkemättömän tiukkoja. Samalla ne ovat hyvä esimerkki nanoteknologialla tuotettujen tuotteiden laadun todentamisen vaikeudesta. Kuten tunnettua, jouduttiin Hubblen pääpeilin geometrisesta virheestä johtuvaa vääristymää myöhemmin korjaamaan erityisellä optisella korjaussarjalla. (ESA/Hubble 2014; Venkatesh & Izman 2007, 2, 26–27.)

Tässä opinnäytetyössä keskitytään optisten sovellusten pinnanlaatuun. Työn tarkoituksena oli tutkia, millaisia pinnanlaatuun vaikuttavia mikrorakenteita timanttityöstettyyn pintaan muodostuu. Tavoitteena oli myös, jos mahdollista, löytää optimaaliset työstöarvot peilipintojen sorvaukseen. Testein ja niiden tuloksia analysoimalla oli tarkoitus löytää se pinnankarheus tai syöttöalue, mihin tähtäämällä päästäisiin oletettavasti parhaaseen lopputulokseen. Näitä arvoja voitaisiin sitten käyttää ohjelmoinnin lähtökohtana tulevilla työstötapahtumissa.

¹ 1 mm = 1000 µm = 1000000 nm

Aiheesta on maailmalla julkaistu useita tutkimuksia, mutta niiden tavoitteet ja/tai lähestymistavat eroavat tästä tutkimuksesta. Suomenkielistä materiaalia aiheesta ei ole julkaistu.

2 Nanotyöstö

Nanotyöstöksi nimitetään sitä lastuavantyöstön osa-aluetta, jossa työstökoneen liikkeet ovat ohjelmoitavissa nanometrien tarkkuudella. Nykyisille nanotyöstökoneille luvataan jopa alle 1 nm:n paikoitustarkkuuksia, mutta käytännössä sellaisia tarkkuuksia ei yleensä saavuteta. Syynä suunniteltua suurempiin muotovirheisiin ovat mm. lämpötilavaihtelut, lastuamisvoimat sekä massan hitauden aiheuttama huojunta suunnan muutoksissa. Työstötapa voi olla jyrsintää, sorvusta, höyläystä tai hiontaa. Tyypillisesti työstö tapahtuu timantista hiotulla terällä ja saavutettava pinnankarheus on alle 10 nanometriä. Muototarkkuus nanotyöstetyillä pinnoilla on luokkaa alle 100 nanometriä. Kyseisenlaisten muototarkkuuksien tavoittelu asettaa suuria vaatimuksia myös koneen toimintaympäristölle. Lämpötilan vaihtelut ja koneen värähtelyt on saatava minimoitua geometriavirheiden eliminoimiseksi. (Venkatesh & Izman 2007, 25–27; Tervola 2010.)

Vaikka nanotyöstön historia ulottuu ajatustasolla 1930-luvun alkupuolelle, onnistuttiin ensimmäiset nanometrien tarkkuuksiin pystyvät koneet rakentamaan vasta 1970-luvulla. Yksi ensimmäisistä nanotyöstökoneista kehitettiin Lawrence Livermore National Laboratoryssa, Kaliforniassa, 1970-luvun lopulla. Se oli suurten optisten elementtien valmistukseen tarkoitettu pystykarainen sorvi, jonka suunniteltu paikoitusresoluutio oli 28 nm ja sillä pystyttiin timanttiterillä tuottamaan pintoja, joiden pinnankarheus oli 4,2 nm (R_a). Kyseinen tarkkuus mahdollisti optisten elementtien valmistamisen ilman jälkikiillotuksen tarvetta. (Venkatesh & Izman 2007, 2, 26.)

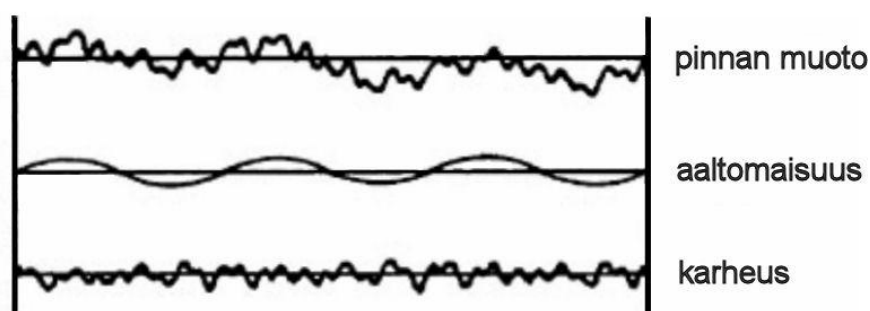
Koska nanotyöstö on prosessina suhteellisen hidas, soveltuu se parhaiten yksittäiskappaleiden ja piensarjojen tekemiseen. Työstettävät kappaleet ovat useimmiten erilaisia muotopeilejä, linsskejä sekä muottiosia. Suurien kappalemäärien valmistuksessa voidaan nanotyöstettyjä pintoja käyttää mastereina, joista varsinaiset tuotantokappaleet replikoidaan. Esimerkiksi linsskejä voidaan

ruiskuvalaa muototarkasti nanotyöstetyillä keernoilla kompensoimalla raaka-aineen kutistumat muottipintoihin. (Tervola 2010; Väyrynen 2013.)

3 Pinnanlaadun suureet

Pinnanlaadun määrittämiseen käytetään monia erilaisia tekniikoita. Tästä johtuen on käytössä myös lukuisia eri mittayksiköitä kuvaamaan pinnan kaksi- ja kolmiulotteista laatua. Jollei suureille ole määritetty muuta yksikköä, on ne ilmoitettu mikrometreinä (μm). Eri mittasuureet eivät ole suoraan verrannollisia keskenään. Aiemmin pinnanlaatua on mitattu vain kahdessa ulottuvuudessa, mutta teknologian kehittyessä kolmiulotteiset mittaustekniikat yleistyvät nopeasti.

Pinta ei ole koskaan täysin sileä, vaan siinä on aina suuritaajuuksista karheutta. Lisäksi pinnanlaatuun vaikuttaa keskipitkän taajuuden muodostama aaltomaisuus. Kuvio 1 voidaan nähdä suuren ja keskisuuren taajuuden vaikutus pinnanlaatuun. Eri taajuudet voidaan erotella toisistaan, ja aaltomaisuuden taajuuksien suodattaminen pois pinnankarheutta tutkittaessa. Pinnantopografiaa tarkasteltaessa on huomioitava myös pinnan suunniteltu profiili. (Raja, Muralikrishnan & Fu 2002, Tähtinen 2009 mukaan; SFS-EN ISO 4287 1999.)



Kuvio 1. Pinnanlaadun osiot (Raja ym. 2002, Tähtinen 2009 mukaan).

Perinteisten, mittakärjellisten pinnankarheusmittareiden mittausrésoluutio ei ole riittävä nanotyöstetyille pinnoille ja käyttöä optisten tuotteiden pinnanlaadun mittaauksissa rajoittaa osaltaan myös niiden pintaa naarmuttava vaikutus (Väyrynen 2013). Nanotyöstettyjen pintojen karheuden mittauksiin käytetäänkin yleensä valon polarisaatioon perustuvia, kappaletta koskettamattomia mittausräitteitä,

kuten interferometrejä. Uudella teknologialla pinnantopografiasta saadaan muodostettua kolmeulotteinen malli, josta pinnan yksityiskohdat ovat selkeästi nähtävissä. Mitattavasta pinnasta luotu 3D-malli helpottaa mahdollisten pinnanvirheiden syiden etsintää.

Yleisimmin käytetty 2D-pinnankarheutta mittaava suure on aritmeettinen profiilipoikkeamien keskiarvo R_a . Kolmiulotteista pinnankarheutta mitataan useimmiten suureella R_q , joka on R_a -arvoa vastaava rms^2 -arvo, funktion z^3 neliön juuri. Pinnan aaltomaisuutta mitataan R-suureita vastaavilla W-suureilla. Taulukossa 1 luetellaan yleisimpiä pinnankarheudenyksiköitä sekä lyhyt kuvaus niistä. (Tähinen 2009.)

Taulukko 1. Pinnankarheuden suureita (SFS-EN ISO 4287 1999, 10–14).

Yksikkö	2D	3D	Kuvaus
R_z	X		Pinnan huippujen ja laaksojen maksimietäisyys mittausjaksolla
R_t	X		Pinnan huippujen ja laaksojen maksimietäisyys mittausmatkalla (voi sisältää useita mittausjaksoja)
R_a	X		Aritmeettinen profiilipoikkeamien keskiarvo mittausjaksolla
R_q		X	Pinnan keskimääräinen rms-karheus mittausalueella
R_v	X		Matalimman laakson etäisyys keskilinjasta
R_p	X		Korkeimman huipun etäisyys keskilinjasta
W_a	X		Aritmeettinen aaltomaisuuden keskiarvo mittausjaksolla
W_q		X	Pinnan keskimääräinen rms-aaltomaisuus mittausalueella

² root mean square (neliöllinen keskiarvo).

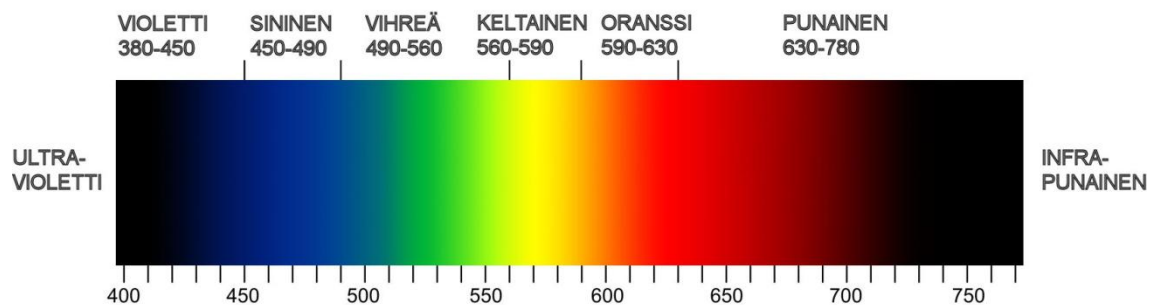
³ pinnankarheuden R_a -arvon funktio

4 Optinen pinnanlaatu

Optinen pinnanlaatu on sidottu valon aallonpituuteen. Standardissa optisesti kiiltäväksi määritellään pinta, jonka topografian korkeuden poikkeamat ovat pienempiä kuin valon aallonpituus. Vastaavasti jos korkeuden poikkeamat ovat sitä suurempia, katsotaan pinnan olevan optisesti matta. (SFS-ISO 10110-8 2010.)

Näkyvän valon aallonpituuden ollessa noin 380–780 nm (kuvio 2), on sen alueella operoitaessa optisesti kiiltävän pinnan yläraja standardin mukaan siis $R_q < 380$ nm (Hunt 1998, 18–19). Yleensä optisissa tuotteissa kuitenkin pyritään moninkertaisesti sitä parempaan pinnanlaatuun. Esimerkiksi linssien pinnanlaatuvaatimus on usein R_q 5 nm, mittalaitteissa jopa R_q 0,5 nm (Burge 2014).

Erilaisissa teknisissä sovelluksissa käytetään usein punaista valoa, jonka aallonpituus on noin 630–780 nm tai ihmisilmälle näkymätöntä infrapunavaloa jonka aallonpituudet ovat yli 780 nm (Hunt 1998, 18–19). Kyseisten pitkien aallonpituuksien käyttö mahdollistaa valon heijastusten tarkemman hallinnan, sillä ne eivät ole niin herkkiä pienille pinnan topografian virheille. Syynä niiden käyttöön voi olla käyttökohteesta riippuen myös komponenttien edullisemmat valmistuskustannukset.



Kuvio 2. Valon spektri (Hunt 1998, 18–19; ESA/Hubble 2014 soveltaen).

Suurin osa optisista tuotteista, kuten linseistä valmistetaan hiomalla ja kiillottamalla, tai nykyään enenevässä määrin valamalla. Näillä tekniikoilla päästään suhteellisen helposti optisesti kiiltävään pinnanlaatuun. Kuitenkin, mentäessä monimutkaisempiin geometrioihin on timanttityöstö usein toimivin, jopa ainoa niiden valmistukseen soveltuva valmistustekniikka. Perinteisesti käsin kiillotta-

malla valmistetut pinnat eivät yleensä täytä optisesti toiminnallisen pinnan geometriatoleransseja.

5 Sorvatun optisen pinnan ongelmat

Pyrittäessä hyvään optiseen pinnanlaatuun sorvaamalla, joudutaan kierrossyöttöä hidastamaan niin paljon, että pinnan topografia alkaa itsessään siroamaan valoa. Tämä ilmiö johtuu siitä, että sorvatun pinnan topografia muodostuu luke-mattomista vierekkäisistä terän nirkon jättämistä urista. Nämä mikroskooppisen pienet urat muodostavat hilarakenteen, josta heijastuessaan valo hajoaa spektriksi. Tätä järjestäytyneestä rakenteesta tapahtuvaa valon sirontaa kutsutaan diffraktioksi. Sorvatun pinnan tapauksessa kierrossyöttö muodostaa hilavakion. Mitä pienempi hilavakio on, eli mitä lähempänä urat ovat toisiaan, sitä voimakkaampaa on valon diffraktio hilassa. Toinen pinnasta heijastuvaan valoon vaikuttava tekijä on interferenssi. Kun valo heijastuu eri kohdista pintarakennetta, sen aallot voivat kuljetun matkaeron takia vaiheistua siten, että ne joko vahvistavat tai vaimentavat toisiaan. Koska ilmiö on riippuvainen katselukulmasta, aiheuttaa se kappaletta liikuteltaessa muutoksia heijastuvan spektrin sävyihin. (Hecht 1987, 333–471.)

Optisissa rakenteissa edellä mainitut ilmiöt aiheuttavat sen, että osa kerätystä informaatiosta katoaa ennen saapumista kohteeseensa. Se voi näkyä esimerkiksi kuvan epätarkkuutena tai valon intensiteetin hiipumisena. Koska nanotyöstettyjen pintojen yhtenä funktiona on useimmiten juuri heijastuksen tarkkuus, tulisi näiden häiriöiden määrän olla mahdollisimman pieni.

Ihmissilmä kykenee erottamaan vain n. 0,1 mm:n suuruisia yksityiskohtia, mutta erottaa pinnasta diffraktion ja kiillon muutokset (Väyrynen 2013). Koska timantti-työstössä käytetty kierrossyöttö on suurimmillaankin vain luokkaa 0,03 mm/r, ei ihmissilmä pysty erottamaan siitä yksittäisiä uria. Tästä johtuen timantilla nanosorvattu pinta näyttää silmämääräisesti tarkasteltuna aina kiiltävältä peilipinnalta. Mikäli pinnasta voi havaita sorvauksesta johtuvia jälkiä, on prosessissa tapahtunut virhe. Yleensä tällaiset virheet johtuvat puutteellisesta lastunpoistosta tai työstettävän materiaalin epäpuhtauksista.

6 Testikokoonpano

6.1 Nanotyöstökone

Pinnanlaatutestit on ajettu Karelia-ammattikorkeakoulun Moore Nanotech 350 FG timanttityöstökoneella (kuva 1), joka on ainoa laatuaan Suomessa. Se on 5-akselinen nanotyöstökone, jonka ohjelmointitarkkuus on 1 nm ja paikoitusresoluutio 0,034 nm. Kone on rakenteeltaan vaakakarainen ja työstettävä kappale kiinnitetään vaakasuuntaiseen pakkaan, jossa sitä voidaan sorvattaessa pyörittää 50–10000 r/min. Vaihtoehtoisesti pakkaa voidaan mikrojrjrsinnässä ja höyläyksessä käyttää C-akselina, jolloin kappaletta voidaan asemoida aste-käännöillä. Teräpidin tai suurnopeuskara asetetaan pyörivälle alustalle (B-akseli), jota voidaan myös kääntää ohjelmallisesti. (Moore Nanotechnology Systems 2007.)



Kuva 1. Nanotech 350FG (Moore Nanotechnology Systems 2014).

Kone sijaitsee lämpötilastabiloidussa tilassa ja myös sen käyttämä paineilma tuodaan lämmöntasausyksikön läpi. Ulkoisten värinöiden eliminoimiseksi kone itsessään lepää ilmatyynyjen päällä. Työstettävän kappaleen pyörimisestä johtuvien värinöiden minimoimiseksi koneen pakka tasapainotetaan aina asetuksen teon yhteydessä.

6.2 Terät

Nanotyöstössä voidaan käyttää timantti-, kovametalli- tai CBN⁴-teriä. Näistä yhdestä kiteestä hiottu timanttiterä on ominaisuuksiltaan ylivoimainen muihin verrattuna. Se on kovaa ja siten terän kuluminen on mahdollisimman vähäistä. Siihen saadaan myös hiottua erittäin terävä ja geometrisesti tarkka leikkuusärmä, joka mahdollistaa todella pienet lastunpaksuudet. Pieni lastunpaksuus yhdistettynä timantin pieneen kitkakertoimeen tuottaa puolestaan vähemmän lämpöä sekä lastuamisvoimia. Lisäksi hyvän lämmönjohtavuutensa ansiosta se myös poistaa tehokkaasti työstötahtumassa syntyvää lämpöä. Kaikki nuo ominaisuudet auttavat osaltaan pyrittäessä geometrisesti tarkkoihin pintoihin sekä huippupinnanlaatuun. (Photonics.com 2013; Venkatesh & Izman 2007, 49–58.)

Terissä käytettävät timantit voivat olla luonnossa kasvaneita kiteitä tai synteettisiä, eli keinotekoisesti kasvatettuja. Testeissä käytetyt terät ovat luonnontimanttiteriä, joiden rintakulma on 0° ja päästökulma 20°. Koska käytetyt lastunpaksuudet ovat alle nirkonsäteen syvyisiä, ei terän asetuskulmalla ollut merkitystä.

Koska testituloksia on tarkoitus hyödyntää myös muun kuin tasopinnan sorvauksessa, katsoin perustelluksi käyttää vain pyöreällä nirkolla varustettuja teriä. Tasomaisilla tai muutoin spesiaaleilla terägeometrioilla saatuja tuloksia ei pysyisi jatkossa soveltamaan kaarevien pintojen sorvauksessa.

6.3 Materiaali

Timanttiterillä voidaan työstää monenlaisia materiaaleja, tärkeimpinä nikkeli, erilaiset alumiini- ja messinkiseokset, polymeerit sekä silikonit. Timantin kemiallisesta koostumuksesta johtuen rautametallit eivät sovellu sillä työstettäväksi. Tämä johtuu siitä, että lastuamisen seurauksena terän kärjen ja työstettävän materiaalin välillä kehittyy lämpöä, jonka seurauksena hiiliatomit siirtyvät materiaalien välillä aiheuttaen leikkaavan särmän korroosiota. (Photonics.com 2013; Väyrynen 2013.)

Poikkeuksena edelliseen on muutama niukkahillinen teräslaatu, joita voidaan karkaistuinä timanttityöstä käyttäen erityistä ultraääniteränpidintä. Kyseistä

⁴ Cubic Boron Nitride

ultraäänipidintä käytettäessä terä tekee suuritaajuuksista elliptistä liikettä, jonka suuruus on luokkaa 1–5 mikrometriä. Tuon liikkeen seurauksena lastuamistapahtuma aina hetkellisesti katkeaa eikä terän kärjen lämpötila pääse nousemaan niin korkeaksi, että hiiliatomien siirtymistä merkittävässä määrin tapahtuisi. Osaltaan lämpötilan hallintaan vaikuttaa myös karkaistun materiaalin pienempi kitka sekä lastun herkempi katkeaminen. (Väyrynen 2013.)

Koska nanotyöstössä käytettävät lastunpaksuudet ovat pieniä, yleensä luokkaa 1–10 μm , voidaan siten työstää myös toisen materiaalin pintaan kasvatettua materiaalikerrosta. Syynä toisen, pintaan kerrostetun materiaalin käyttöön voi olla esim. sen pohjamateriaalia parempi lastuttavuus tai korroosionkesto. Tällaisina pintamateriaaleina, joihin lopullinen pinta työstetään, käytetään mm. kultaa, nikkeliä sekä alumiinia. Mikäli pinnoitettava kappale on valmistettu riittävän tarkasti, voi pintaan kasvatettu kerros olla vain noin 10 mikrometrin vahvuinen.

Testeissä käytettäväksi materiaaliksi valitsin elektrolyyttisesti kasvatetun nikkelin. Valintaa puolsivat materiaalin tasalaatuisuus sekä sen pieni, 2–6 nm:n rae-
koko (Weil & Parker 1990, 112). Se on hyvän lastuttavuutensa ja kovuutensa vuoksi myös yleisesti käytetty materiaali nanotyöstössä (Väyrynen 2013). Pohjamateriaalina, jonka pintaan nikkeli on kasvatettu, toimii alumiini.

Pinnanlaatuun vaikuttavien muuttujien minimoimiseksi keskityin testeissä tasopinnan sorvaukseen. Testikiekkojen halkaisija oli 50 mm ja kokonaispaksuus 5 mm. Kiekkoihin kasvatetun nikkelierroksen paksuus oli n. 0,3 mm.

7 Testiajot

Koska standardi määrittää optisesti kiiltävän pinnan suhteessa topografian korkeusvaihteluihin, päätin ottaa testien lähtökohdaksi pinnan R_t -arvon. Suunnitelmana oli ensivaiheessa sorvata kahdella erikokoisella terällä laskennallisesti samanlaiset pinnat ja verrata niiden mittaustuloksia keskenään. Kyseisellä testillä olisi mahdollista nähdä, ovatko teoriassa samanarvoiset pinnat sitä myös todellisuudessa. Toisessa vaiheessa tarkoituksena oli sorvata toisella teristä useita tarkasti määriteltyjä pintoja ja verrata niitä keskenään toiminnallisesti parhaan pinnanlaadun löytämiseksi.

7.1 Laskennallinen pinnankarheus

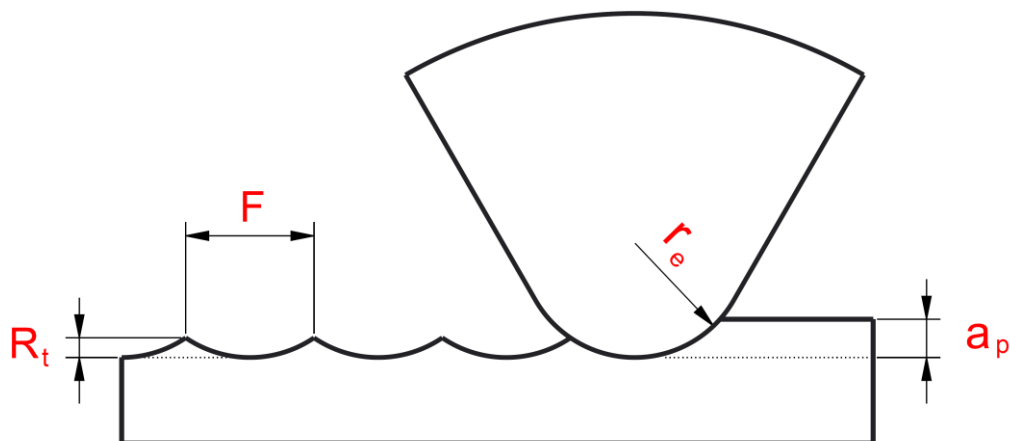
Likimääräinen pinnan huippujen ja laaksojen välinen matka voidaan laskea kaavalla

$$R_{t,L} = \frac{F^2}{8r_e} ,$$

jossa $R_{t,L}$ on likimääräinen pinnan huippujen ja laaksojen välinen matka [mm], F on kierrossyöttö [mm/r] ja r_e on terän nirkonsäde [mm] (Sandvik Coromant 2010, s. A18.). Koska saavutettavaan pinnanlaatuun vaikuttaa monta muutakin muuttujaa, on em. kaavalla laskettu likiarvo yleensä riittävä. Ylimääräisten muuttujien eliminoimiseksi ovat kaikki tässä tutkimuksessa käytetyt teoreettiset arvot kuitenkin laskettu tarkoilla matemaattisilla kaavoilla. Koska testien ensimmäisen vaiheen tavoitteena oli luoda kaksi R_t -arvoltaan täysin yhteneväistä pintaa, oli sitä varten määritettävä terän syöttö/kierros. Kuten kuviosta 3 voidaan nähdä, on syöttöarvo halutulle pinnankarheudelle laskettavissa nirkonsäteen avulla. Pythagoraan lausetta hyödyntäen voidaan syöttö laskea kaavalla

$$F = 2 * \sqrt{r_e^2 - (r_e - R_t)^2} ,$$

jossa F on kierrossyöttö [mm/r], r_e on terän nirkonsäde [mm] ja R_t on haluttu pinnan huippujen ja laaksojen välinen matka [mm].



Kuvio 3. Pinnan topografian muodostuminen sorvauksessa.

7.2 Leikkuunopeus

Timanttityöstössä leikkuunopeuden valinta ei näyttele yhtä merkittävää roolia kuin normaalissa koneistuksessa. Ohut lastun paksuus yhdistettynä pieniin lastuamisvoimiin ja erittäin terävään leikkaavaan särmään aiheuttavat sen, että lastuamisnopeudella ei ole suurta merkitystä pinnanlaatuun. Timanttiterällä voidaan lastuta menestyksekkäästi, hieman materiaalista riippuen, leikkuunopeuksilla >1 m/min. Nanosorvauksessa käytetäänkin yleisesti vakio kierrosnopeuksia, jolloin työkappaleen pyörimisestä johtuvat värinät ovat helposti hallittavissa.

Koska tässä tutkimuksessa oli pyrkimyksenä minimoida pinnanlaatuun vaikuttavat muuttujat, myös leikkuunopeuden muutos työstöhalkaisijan muutoksen myötä eliminoitiin. Tämä tapahtui käyttäen testikiekkojen koneistuksissa vakioleikkuunopeutta, jolloin kappaleen pyörimisnopeus muuttuu työstöhalkaisijan muuttuessa.

Koska kaikki löytämäni aiheeseen liittyvät tutkimukset on tehty vakioleikkuunopeudella, päädyin aiemman kokemukseni pohjalta leikkuunopeuteen 100 m/min. Kyseinen leikkuunopeus antaa testikiekkojen pinnanlaadun mittausalueelle pyörimisnopeuden, joka on Singaporen yliopiston julkaisemassa tutkimuksessa havaittu pinnanlaadun suhteen toimivaksi (Pramanik 2004). Koska vakioleikkuunopeutta käytettäessä karan pyörimisnopeus teoriassa kasvaisi kappaleen keskipisteessä äärettömäksi, rajoitettiin se arvoon 2652 r/min, joka kyseisellä leikkuunopeudella vastaa 12 mm:n halkaisijaa.

7.3 Lastun paksuus

Nanotyöstössä viimeistelylastunpaksuudet pyritään pitämään pieninä. Pieni lastuamissyvyys, a_p (kuvio 3), tuottaa vähemmän lastuamisvoimia sekä lämpöä, jotka voisivat vaikuttaa geometrian tarkkuuteen. Se myös vähentää koneen värinöitä mahdollisessa hakkaavassa työstössä. Valittavaan lastunpaksuuteen vaikuttavat osaltaan myös työstettävän materiaalin ominaisuudet sekä käytettävän terän geometria. (Pramanik 2004.)

Pohjautuen omaan timanttityöstökokemukseeni ja edellä mainittuun Singaporen yliopiston julkaisemaan tutkimukseen, päädyin käyttämään testeissä 4 μm :n

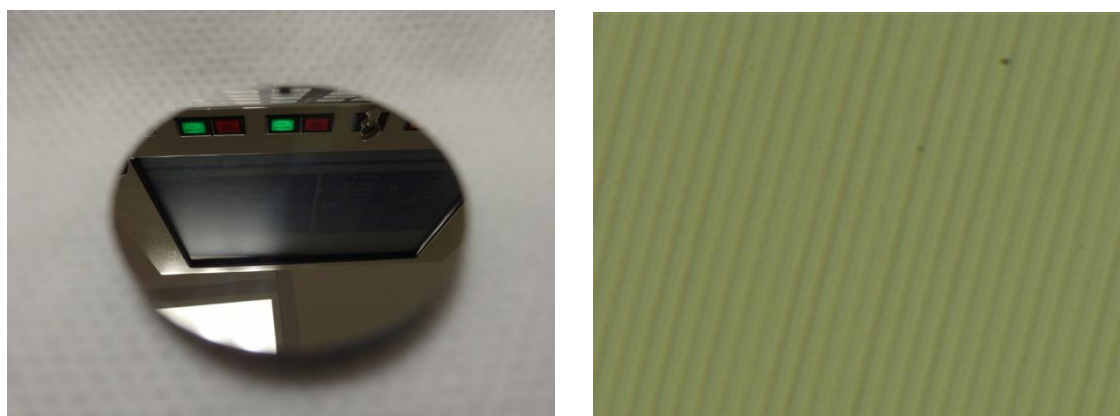
lastunpaksuutta. Kyseisessä tutkimuksessa paras pinnanlaatu kemialliseen nikeliin saatiin juuri tuolla lastuamissyvyydellä.

8 Testipintojen analyysit

8.1 Silmämääräinen tarkastelu

Silmämääräisesti tarkasteltuna kaksi ensimmäistä, laskennallisesti samanlaatuista pintaa eivät eronneet toisistaan. Odotetusti molemmat näyttivät täysin sileiltä, eikä pinnoista pystynyt erottamaan mitään sorvauksesta johtuvia yksityiskohtia (kuva 2). Hieman katselukulmasta ja valaistuksesta riippuen saattoi pinnoilla näkyvästä valon diffraktiosta päätellä pintojen jotenkin eroavan toisistaan. Erot olivat kuitenkin niin pieniä, ettei pintoja voinut asettaa paremmuusjärjestykseen.

Muut testipinnat, joissa oli pyritty parempaan pinnankarheuteen, eivät silmämääräisessä tarkastelussa eronneet merkittävästi kahdesta ensimmäisestä pinnasta. Tarkasteltaessa kaikkia testipintoja rinnakkain, näytti laskennallisesti parhaan pinnankarheuden omaava pinta aiheuttavan hieman muita vähemmän diffraktiota. Erot kiekkojen välillä olivat kuitenkin niin pieniä, että oli mahdoton sanoa, johtuiko ero pinnankarheudesta vai heijastuvan valon suunnasta.



Kuvat 2 & 3. Test kiekko 2 ja kamerasuurennos sen pinnasta.

(Kuvat: Nyyssönen 2013)

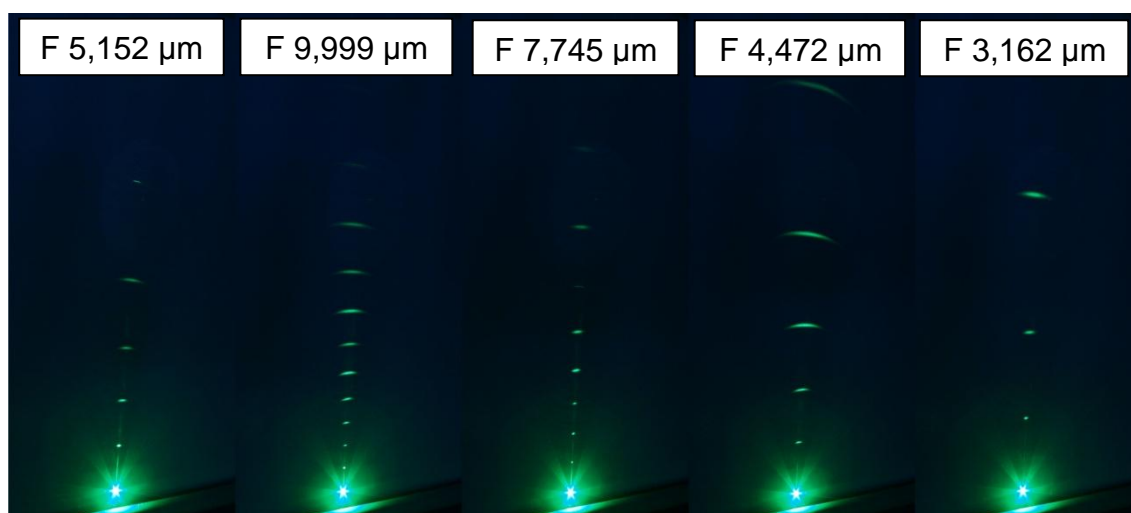
500 x suurentavalla kameralla pintoja tarkasteltaessa pystyi niistä odotetusti näkemään työstössä käytetyn syöttönopeuden eron. Pinnoista erottui myös mik-

roskooppisen pieniä epäpuhtauksia (kuva 3). Itse leikkuujäljessä ei näyttänyt olevan merkittäviä eroja kiekkojen välillä.

8.2 Valon projisointi

Jokaiselle kiekolle tehtiin valon projisointitesti, jolla pystytään arvioimaan pinnasta heijastuvan valon diffraktion määrää. Testi suoritettiin heijastamalla vihreä laser pöydälle asetettujen kiekkojen pinnasta 0,4 metrin päässä olevalle valkokankaalle. Mikäli pinnoissa tapahtuisi merkittävää valon taipumista, näkyisi se diffraktiokuviona valkokankaalla. Mitä harvemmassa sivuheijastukset, eli diffraktio-maksimit sijaitsevat, sitä suurempaa on valon diffraktio pinnassa. (Hecht 1987, 424–427.)

Projisoinnin tulos oli ristiriitainen silmämääräiseen tarkasteluun verrattuna. Las-kennallisesti sileimmäksi työstetty pinta, joka silmämääräisesti oli näyttänyt parhaimmalta, osoittautui selkeästi eniten valoa diffraktoivaksi. Odotetusti tulokset tukevat teoriaa, että diffraktion määrä lisääntyy hilavakion pienentyessä. Kuvas-ta 4 näkyy, kuinka diffraktio-maksimien välinen matka kasvaa käytetyn syöttö-nopeuden pienetessä.



Kuva 4. Testiekkojen diffraktiokuviot

(Kuva: Nyyssönen 2014)

8.3 Pinnankarheuden mittaukset

Testikiekkojen pinnanlaatumittaukset tehtiin Itä-Suomen yliopiston fotonikan instituutissa Joensuussa. Mittaukset suoritti yli-insinööri Pertti Pääkkönen.

Mittauksessa käytettiin WYKO NT9300 optista profilometriä. Karheusmittaukset suoritettiin 50x NA 0,55 objektiivilla, jonka resoluutio on 0,49 µm. Mittaustapana oli Phase Shift Interferometry (PSI), jonka toistettavuus on noin 0,3 nm. Pintojen muotojen mittaukseen käytettiin 2,5x NA 0,07 sekä 10x NA 0,3 objektiiveja. (Pääkkönen 2013.)

Pinnankarheuden mittaukset suoritettiin 0,5 mm:n välein 5*5 mm:n kokoisesta matriisista. Matriisin keskipiste sijaitsi 12,5 mm:n päässä näytteiden keskipisteestä, jolloin mittausalue on kokonaisuudessaan vakioleikkuunopeuden alueella. Kustakin pinnasta mitatun 25 mittauksen keskiarvot sekä keskihajonnat näkyvät taulukosta 2. (Pääkkönen 2013.)

Mittaustulosten lisäksi taulukkoon 2 on kerätty myös testipintojen laskennalliset pinnankarheudet, niiden laskennassa käytetyt nirkonsäteet sekä työstössä käytetyt syöttönopeudet. Syöttönopeuksien laskennassa käytetyt nirkonsäteet on mitattu timanttityöstökoneen asetuskameralla ja ne saattavat poiketa todellisuudesta. Mahdollisen virheen määrä on luokkaa alle 100 nm. Koska mittaustulosten suureet ovat R_q ja R_a , on taulukkoon lisätty pintojen laskennalliset R_a -likiarvot. Likimääräinen R_a voidaan laskea kaavalla

$$R_{a,L} = \frac{F^2}{32 * r_e} ,$$

jossa $R_{a,L}$ on likimääräinen aritmeettinen profiilipoikkeamien keskiarvo [mm], F on kierrossyöttö [mm/r] ja r_e on terän nirkonsäde [mm] (Tamizharasan, Selvaraj & Noorul 2006, 677).

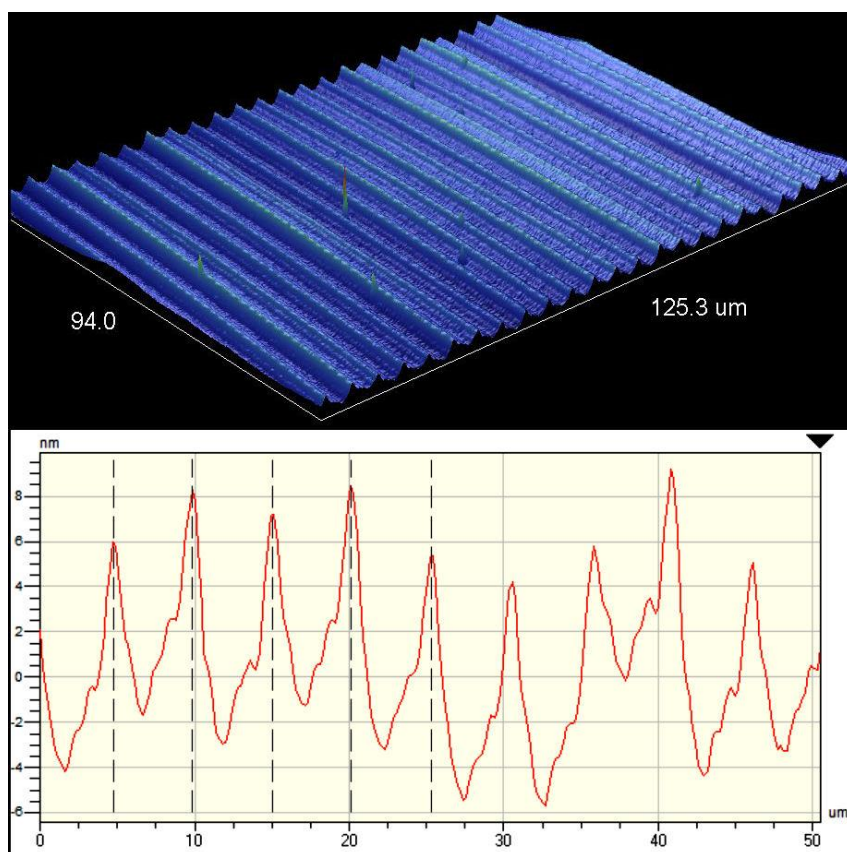
Taulukko 2. Testipintojen numeerinen tieto.

Työstö				Muunto	Mittaukset			
pinta nro	$R_{t,LASK}$ [nm]	R_e [mm]	F [μm/r]	$R_{a,L}$ [nm]	R_q [nm]	STD_R_q [nm]	R_a [nm]	STD_R_a [nm]
1	5	0,663614	5,152	1,25	4,01	0,33	3,21	0,25
2	5	2,499341	9,999	1,25	4,81	0,34	3,93	0,17
3	3	2,499341	7,745	0,75	3,63	0,24	2,91	0,19
4	1	2,499341	4,472	0,25	2,86	0,18	2,31	0,13
5	0,5	2,499341	3,162	0,13	2,01	0,38	1,53	0,15

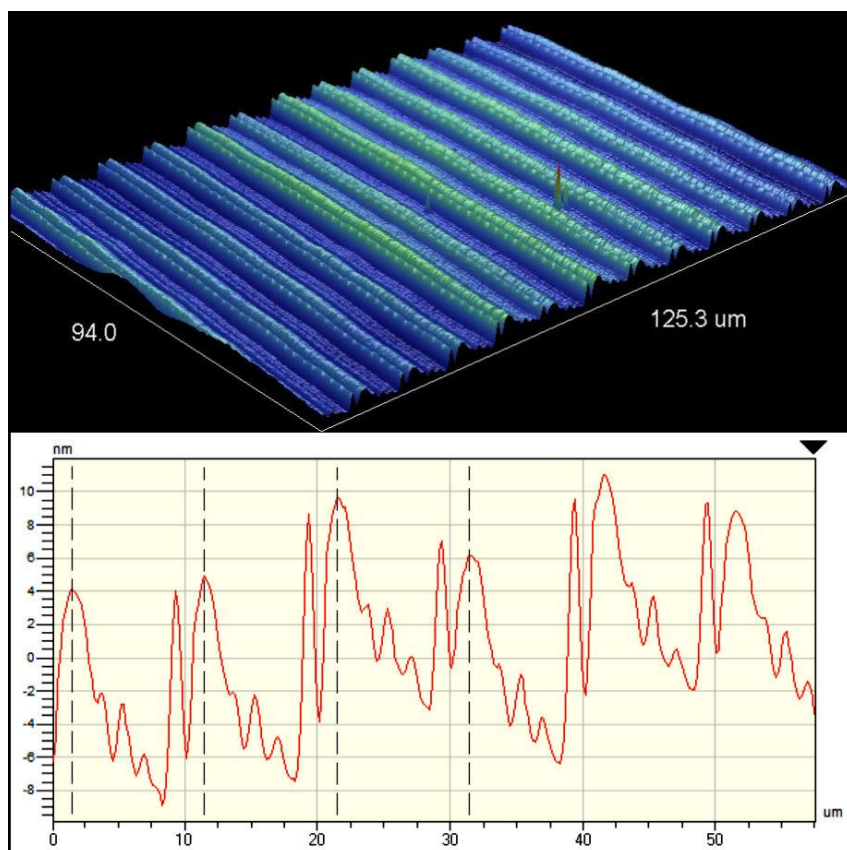
Verrattaessa laskennallisia pinnankarheuksia mitattuihin R_a -arvoihin, voidaan havaita, etteivät ne korreloi keskenään. 5 nm ($R_{t,LASK}$) pintojen kohdalla mitattu pinnankarheus (R_a) on noin kolminkertainen laskennalliseen karheuteen verrattuna. Tavoiteltaessa pienempiä pinnankarheuksia eivät mitatut pinnankarheudet kuitenkaan parane samassa suhteessa. Pinnan nro 5 mitattu pinnankarheus (R_a) onkin jo yli kymmenkertainen tavoiteltuun nähden.

Tarkasteltaessa mitattuja rms-pinnankarheuksia (R_q) nähdään, että niiden arvot seuraavat R_a -arvojen trendiä, ollen n. 20 % niitä suurempia. Voidaan myös havaita, että muiden pintojen osalta keskipoikkeama (STD_R_q) pienenee samassa suhteessa mitatun pinnankarheuden kanssa, mutta viidennen pinnan kohdalla poikkeama kasvaa hälyttävän suureksi. Kun pintojen 1–4 keskipoikkeama (STD_R_q) vaihtelee välillä 6–8 % R_q -arvosta, on vastaava poikkeama pinnan 5 tapauksessa jo 19 %. Edellä mainitut asiat huomioiden voidaan tulla siihen johtopäätökseen, että vaikka kyseisen terän syöttönopeutta vielä tiputettaisiin, ei pinnanlaatu enää merkittävästi parantuisi nykyisestään.

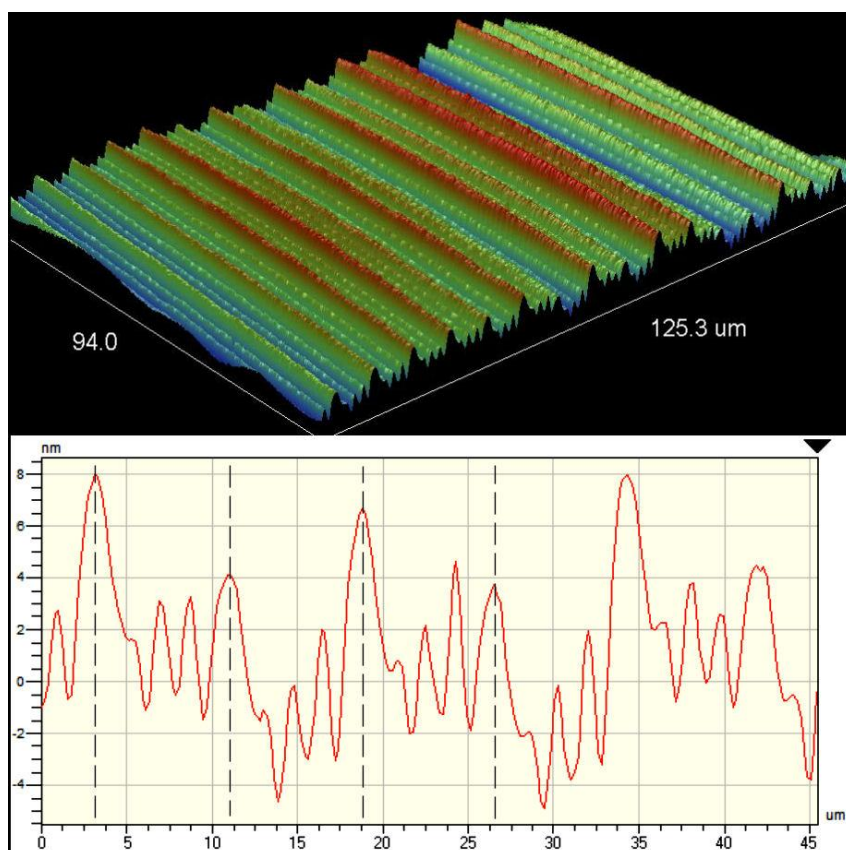
Syyn mittaustulosten suhteelliseen huononemiseen voi päätellä mittausalueelta muodostetuista 3D-kuvista sekä pinnan topografiakäyristä (kuviot 4–8). Kun kuviosta 4 on vielä nähtävissä siistit terän nirkon muotoiset urat, niin jo kuvion 5 laskennallisesti samanlaisesta, mutta suuremmalla terällä ajetusta pinnasta alkaa näkyä huomattavia virheitä. Ilmiö pahenee huomattavasti pienempiin syöttönopeuksiin mentäessä. Viidennen, sileimmän pinnan kohdalla aineen repeytymisestä ja mankeloitumisesta johtuvat topografian virheet ovat jo moninkertaisia laskennalliseen karheuteen verrattuna.



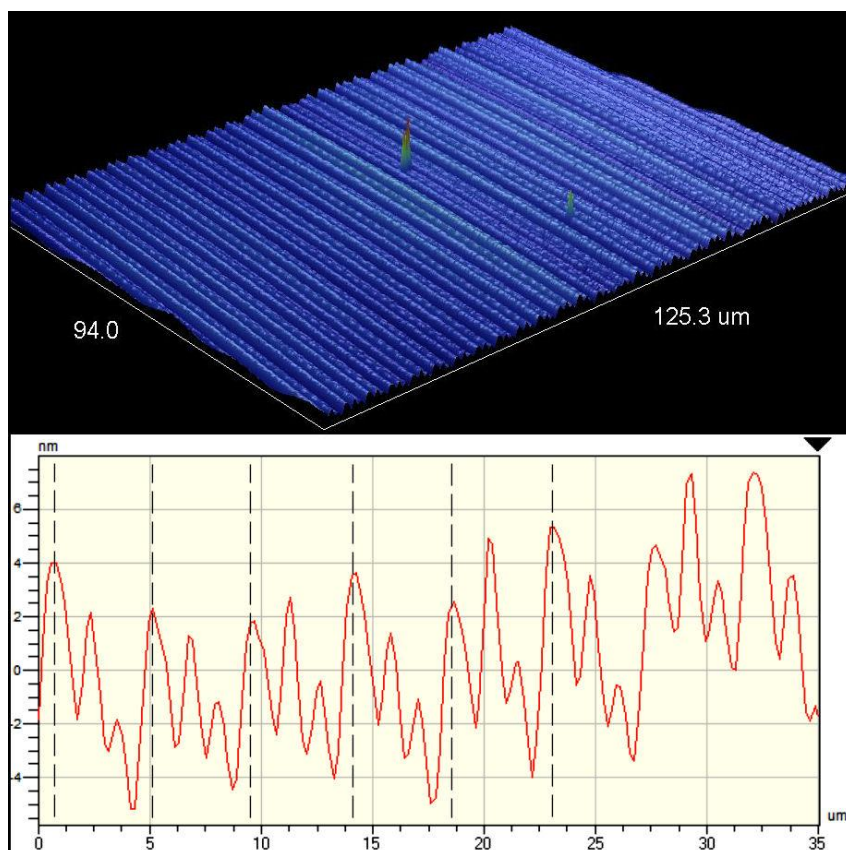
Kuvio 4. Pinta 1 (Pääkkönen 2013 soveltaen).



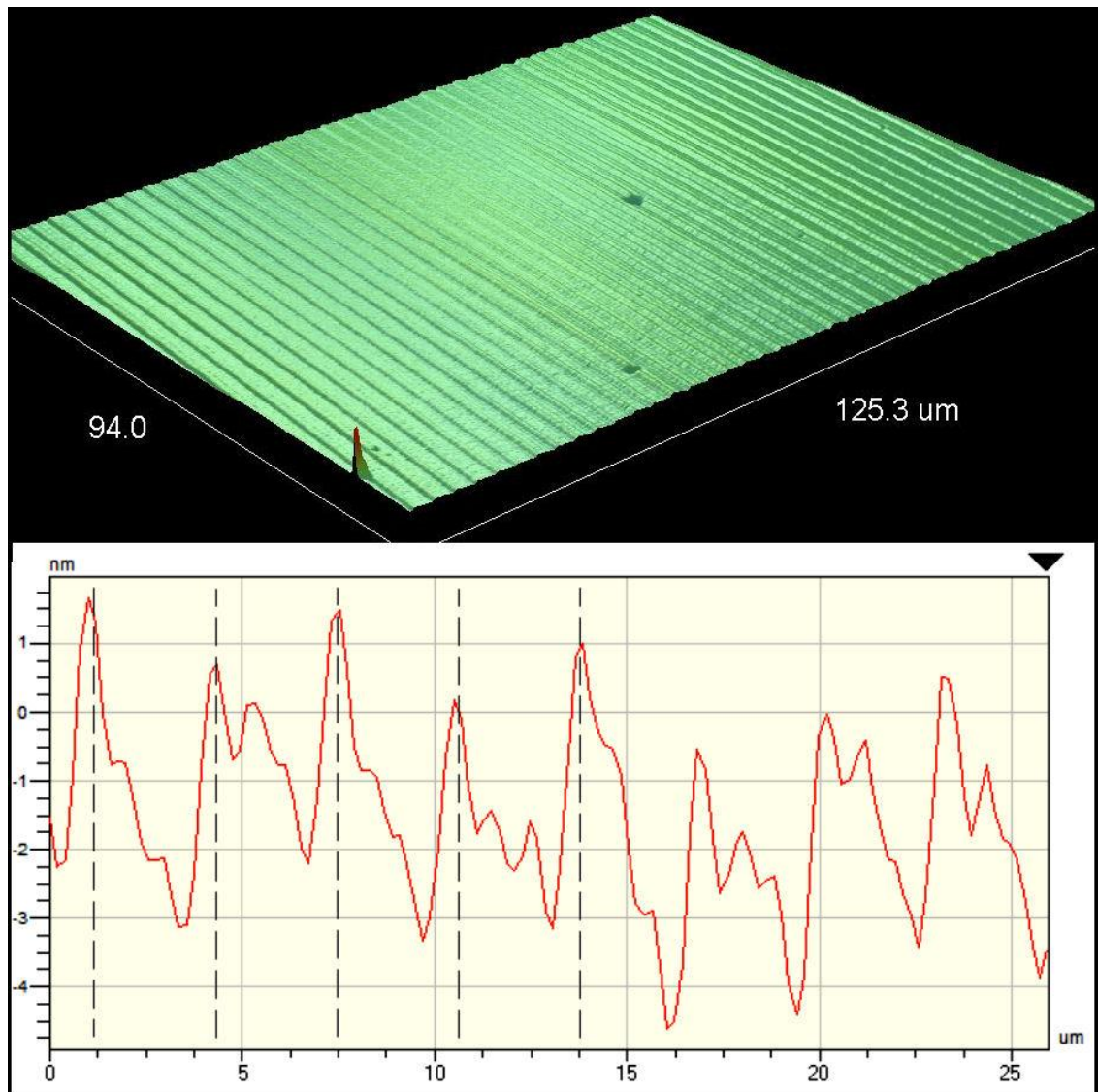
Kuvio 5. Pinta 2 (Pääkkönen 2013 soveltaen).



Kuvio 6. Pinta 3 (Pääkkönen 2013 soveltaen).



Kuvio 7. Pinta 4 (Pääkkönen 2013 soveltaen).



Kuvio 8. Pinta 5 (Pääkkönen 2013 soveltaen).

Pinnan topografiakäyriin on mustalla katkoviivalla merkitty syöttöliikkeen periodi. Pinta 1:n työstöperiodit ovat lähes yhteneväisiä ja pääosin nirkon muotoisia, eli työstötapahtuma on ollut hallittu. Toisen pinnan kohdalla silmiinpistävää on aineen mankeloitumisen aiheuttamat kaksoishuiput, jotka näkyvät selvästi myös 3D-kuvassa, sekä uran pohjan alkava repeily. Pintojen 3 ja 4 kohdalla hallitsevana piirteenä on uran pohjan repeily. Viidennen pinnan topografia on parhaiten nähtävissä 3D-kuvasta (ks. kuvio 8). Uran muoto on siinä selvästi toispuoleinen ja aaltomainen. Syynä kyseiseen pinnanmuodostukseen on terän leikkaavuuden alentuminen. Aine on terän edetessä mankeloitunut sivuille siirtäen harjanteen osittain edellisen leikkuu-uran kohdalle. Samainen harjanteen siirtymä on pienemmässä mittakaavassa havaittavissa myös muissa pinnoissa.

Mankeloitumisen seurauksena urien väliseen harjanteeseen siirtyy lisää materiaalia sekä sen muoto muuttuu laskennallista, teoreettista pintaa terävämmäksi. Näistä syistä myös sen korkeus kasvaa laskettua suuremmaksi. Mankeloituvan aineen määrä on riippuvainen terän leikkaavansärmän terävyydestä, työstettävästä materiaalista sekä lastun poikkileikkauksen suhteista. Kun lastuamissyvyys suhteessa nirkonsäteeseen pienenee, muuttuvat lastuamisvoimat suurelta osin terän suuntaisiksi pyrkien työntämään terää irti työstettävästä pinnasta (Sandvik Coromant 2010, s. A17).

Kun keskenään verrataan kahta laskennallisesti samanlaista pintaa, vaikuttaisi pinnan 1 työstöön käytetty, pienempi nirkoinen terä mittaustulosten sekä pinnanmuotokuvioiden perusteella leikanneen isompaa terää paremmin. Tämä voi johtua joko sen paremmasta terävyydestä tai siitä, että sen leikkuussyvyys oli suurempi suhteessa nirkonsäteeseen. Koska testipinnat 2–5 on koneistettu peräkkäin samalla terällä, voimme olettaa, ettei leikkaavassa särmässä ole niiden välillä merkittävää eroavuutta.

Työstöjäljen repeämien syvyys näyttää kuvioiden perusteella olevan lähes vakio, vaihdellen välillä 2–3 nm. Repeämien muodon ja syvyyden arvioimista vaikeuttaa pysty- ja vaaka-akseleiden suuri mittakaavaero. Kuvioissa teräväpohjaisilta näyttävät repeämät ovat todellisuudessa huomattavan loivia. Niiden syntymekanismeja ei voi varmuudella päätellä käytettävissä olevista tiedoista, mutta niiden syvyys viittaa vahvasti kemiallisen nikkelin raekokoon. Oletettavasti materiaali pyrkii lastuttaessa repeytymään raerajoilta. Koska kemiallisen nikkelin raekoko on pieni, alkaa se merkittävästi vaikuttamaan pinnanlaatuun vasta pyrittäessä $R_t > 10$ nm:n karheuksiin.

8.4 Yhteenveto

Tuloksia tarkasteltaessa on huomioitava, että vaikka mitatut pinnankarheudet ovat moninkertaisia laskennallisiin karheuksiin verrattuna, niin virheiden todellinen kokoluokka on kuitenkin todella pieni, keskimäärin n. 2 nm. Virheiden suuruusluokkaa voi suhteuttaa siihen, että R_a 0,02 (20 nm) määritellään jo peilipinnaksi (Sandvik Coromant 2010, s. i14). Tutkimusta varten sorvatuista testipinnoista huonoimmankin karheus oli alle R_a 0,004 (4 nm). Kyseisen laatuista pin-

toja ei enää pysty arvioimaan silmämääräisesti, vaan pinnanlaatu on todennettava jollain muulla menetelmällä.

Pinnankarheuden osalta voidaan tutkimuksen pohjalta päätyä siihen johtopäätökseen, että ohjelmoinnissa on käytettävä suuria varmuuskertoimia. Tulosten perusteella näyttää siltä, että jos ohjelmoinnin lähtökohdaksi otetaan noin 2 nm tavoiteltua parempi R_a -arvo, niin kemiallista nikkeliä työstettäessä todellinen pinnankarheus osuu lähelle tavoitetta. Oletettavasti marginaali on muilla materiaaleilla hieman erilainen.

Kahden laskennallisesti samanlaisen pinnan tuloksista voi nähdä, että ainakin tässä tapauksessa pienempi nirko johti pinnankarheuden suhteen parempaan lopputulokseen. Tuolla perusteella kannattaisi siis hyvään pinnankarheuteen pyrittäessä valita mahdollisimman pieninirkoinen terä. Tämä kuitenkin tarkoittaisi kierros-syötön hidastumista ja johtaisi sitä kautta työstöaikojen kasvamiseen.

Diffraktiokuvioiden perusteella kierrossyötön hidastaminen ja sitä kautta paremman pinnankarheuden tavoittelu ei ole valon siroutumisen suhteen järkevää. Jos tavoitteena on mahdollisimman vähäinen valon diffraktio, olisi käytettävä mahdollisimman suurta syöttönopeutta. Tällöin olisi kuitenkin käytettävä suuri nirkoista terää, joka puolestaan vaikuttaisi huonontavasti pinnanlaatuun. Täysin diffraktoimaton, optisesti kiiltävä sorvattu pinta on hilamaisen rakenteensa takia lähes mahdoton toteuttaa.

9 Pohdinta

Timanttityöstettyjen optisten pintojen laatu on monen tekijän summa. Suunnittelun pinnanlaadun saavuttamiseksi täytyy pystyä yhdistämään sopiva terägeometria, oikeat työstöarvot sekä käyttökohteeseen sopiva materiaali. Edellä mainittujen työstötapautumaan liittyvien muuttujien lisäksi lopputulokseen vaikuttavat huomattavasti myös tuotteen suunnittelun taso, mallinnuksen tarkkuus sekä työstöohjelman laskentaan käytetty ohjelmisto. Jotta päästäisiin optimaaliseen pinnanlaatuun täytyy tuotantoketjun kaikkien osatekijöiden olla kunnossa.

Tuotettu kappale, sen geometria ja pinnanlaatu, täytyy myös pystyä todentamaan. Tällä vältetään Hubble-teleskoopin pääpeilin kaltaisilta kalliiksi tulevilta

virheiltä. Jotta nanotyöstetyt pinnat voitaisiin todentaa, täytyy mittalaitteen mittausresoluution olla alle nanometrin luokkaa. Pinnankarheuden osalta siihen jo pystytään, mutta suurempien vapaamuotoisten kappaleiden geometrian mittaus tuolla tarkkuudella on nykypäivänä vielä hankalaa. NykYTEKNIKALLA ainoa keino todentaa nanotyöstetyn pinnan muototarkkuus nanomittakaavassa on ajaa käytettävällä terällä parabolinen testipinta, jonka kaarevuus voidaan mitata interferometrillä. Kyseinen mittaustekniikka ei kuitenkaan voi todentaa ohjelmoinnista, lämpötilan vaihteluista tai terän kulumisesta johtuvia virheitä.

Tämän tutkimuksen osalta geometrian mittauserävarmuus suljettiin pois keskittymällä tasopintojen sorvaukseen. Tulosten perusteella on nähtävissä, ettei edes halutun pinnankarheuden saavuttaminen ole nanotasolla aina selviö. Kun tavoitellaan raaka-aineen raekoon alittavia pinnankarheuksia, alkavat pienet, normaalikoneistuksen mittakaavassa tunnistamattomat muuttujat vaikuttamaan lopputulokseen.

Tätä tutkimusta varten ajettujen testipintojen määrä on liian pieni, jotta tuloksia voisi yleistää. Käytetyillä terillä ja materiaalilla tulokset kyllä antavat tietoa suunnitellun ja toteutuneen pinnan eroista, mutta yleisemmän työstöohjeen luomiseksi täytyisi testejä ajaa lisää. Vastaavat testipinnat täytyisi ajaa myös muihin materiaaleihin ja verrata tuloksia nyt saatuihin. Myös nirkonsäteen vaikutusta pinnankarheuteen täytyisi tutkia lisää. Olisi ajettava useammalla terällä laskennallisesti samanlaisia pintoja eri materiaaleihin ja verrata niiden mittaustuloksia sen selvittämiseksi, muuttuuko laskennallisen ja toteutuneen pinnankarheuden ero suoraan verrannollisesti suhteessa nirkonsäteeseen.

Tutkimus antoi hyödyllistä tietoa pinnankarheuden muodostumisesta ja sen laskentaan liittyvistä epävarmuuksista. Ilman jatkotestejä sen todellinen painoarvo uhkaa kuitenkin jäädä aika kevyeksi. Toiveissa on, että lähitulevaisuudessa löytyisi riittävästi vapaata koneaikaa jatkotestien suorittamiseksi. Niiden perusteella olisi mahdollista luoda suuntaa antava ohjeistus työstön suunnittelun tueksi. Työstön suunnittelun kannalta olisi myös oleellista tietää tuotteen käyttötarkoitus ja/tai mitä pinnan ominaisuuksia sen suunnittelija haluaa painottaa.

Lähteet

- Burge, J. Introductory Optomechanical Engineering. University of Arizona.
<http://fp.optics.arizona.edu/optomech/Fall13/Notes/10%20Specifying%20optical%20components.pdf>. 12.1.2014.
- ESA/Hubble. 2014. About Hubble. <http://www.spacetelescope.org>. 25.1.2014.
- Hecht, E. 1987. Optics. Canada: Addison-Wesley Publishing Company. 333–471.
- Hunt, R. 1998. Measuring Colour. Englanti: Fountain Press. 18–19.
- ISO 10110-8. 2010. Optics and photonics: Preparation of drawings for optical elements and systems. Surface texture; roughness and waviness. Sveitsi: ISO.
- Moore Nanotechnology Systems. 2007. 350FG Detailed Specification. USA: Moore Nanotechnology Systems LLC.
- Moore Nanotechnology Systems. 2014. Nanotech 350FG.
<http://www.nanotechsys.com/machines/nanotech-350fg-freeform-generator>. 27.1.2014.
- Photonics.com. 2013. Fotoniikan käsikirja, timanttityöstö.
<http://www.photonics.com/EDU/Handbook.aspx?AID=25504>. 11.1.2014.
- Pramanik, A. 2004. Ultra-precision machining of electroless-nickel plated die material. National university of Singapore. Department of mechanical engineering. Opinnäytetyö. Saatavissa:
<http://web.ebscohost.com/ehost/pdfviewer/pdfviewer?sid=b2e22ad6-403a-452d-baba-8788423b5d46%40sessionmgr113&vid=2&hid=120>.
- Pääkkönen, P. 2013. Mittausraportti. Itä-Suomen yliopisto. Fotoniikan instituutti. Joensuu: Fotoniikan instituutti. 15.11.2013.
- Sandvik Coromant. 2010. Lastuavat työkalut, Tekninen käsikirja. Ruotsi: Ab Sandvik Coromant.
- SFS-EN ISO 4287. 1998. Geometrical product specifications (GPS). Surface texture: Profile method. Terms, definitions and surface texture parameters. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.
- Tamizharasan, T., Selvaraj, T. & Noorul Hag, A. 2006. Analysis of tool wear and surface finish in hard turning. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. nro 28, 671–679. Saatavissa:
<http://web.ebscohost.com/ehost/pdfviewer/pdfviewer?sid=b2e22ad6-403a-452d-baba-8788423b5d46%40sessionmgr113&vid=2&hid=120> 14.1.2014.

- Tekes 2010. FinNano esite. Saatavissa:
http://www.tekes.fi/Julkaisut/finnano_esite.pdf. 6.1.2014.
- Tervola, J. 2010. Nanotarkkuusluokan kone mahdollistaa uudet sovellukset. Metallitekniikka 1/2010, 12–14.
- Tähtinen, S. 2009. Pinnanlaadun määrittystekniikat ja mittauslaitteet viimeistelysorvauksen yhteydessä. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Konetekniikan koulutusohjelma. Kandidaatintyö.
- Venkatesh, V. & Izman, S. 2007. Precision Engineering. USA: Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited. 1–30, 49–58.
- Väyrynen, J. 2013. Tutkija. Karelia-ammattikorkeakoulu. Suullinen tiedonanto.
- Weil, R. & Parker, K. 1990. The Properties of Electroless Nickel. Teoksessa Mallory, G. & Hadju, J. (toim.). Electroless plating: fundamentals and applications. USA: Noyes Publications/William Andrew Publishing. 111–119.